

表面摩擦磨损与润滑

## 2A12 铝合金在两种体系中微弧氧化膜层的磨损性能研究

黄利保, 郝建民, 张斌英, 马建基

(长安大学 材料表面强化研究所, 西安 710054)

**摘要:** **目的** 比较两种不同溶液体系中铝合金微弧氧化膜层的摩擦磨损性能。**方法** 以 2A12 铝合金为研究对象, 通过微弧氧化技术, 制备了在两种体系中的微弧氧化膜层。利用扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD)、显微硬度计、摩擦磨损机, 研究了两种不同溶液体系中的微弧氧化膜层的形貌、厚度、硬度和磨损性能的差异。**结果** 锆盐体系中膜层的生长速率较磷酸盐中的更大。锆盐和磷酸盐体系中膜层的硬度分别为 1050HV 和 1250HV。锆盐体系的膜层主要由  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{c-ZrO}_2$  和少量的  $\text{t-ZrO}_2$  组成, 磷酸盐体系膜层的主要成分是  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。锆盐体系中, 450 V 电压下膜层的摩擦系数为 0.425, 500 V 电压下膜层的摩擦系数为 0.375; 磷酸盐体系中, 450 V 电压下膜层的摩擦系数为 0.328, 500 V 电压下膜层的摩擦系数为 0.325。**结论** 锆盐膜层的摩擦系数总体大于磷酸盐膜层。在磨损过程中, 被磨掉的 GCr15 材料填充到膜层的凹坑中。两种溶液体系下, 膜层在高电压下表现出更小的摩擦系数。磨损起始阶段为磨粒磨损, 稳定阶段为粘着磨损。

**关键词:** 铝合金; 微弧氧化; 锆盐; 磷酸盐; 耐磨性

中图分类号: TG174.4; TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)05-0185-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.05.022

## Wear Properties of Microarc Oxidation Coating of 2A12 Aluminum Alloy in Two Systems

HUANG Li-bao, HAO Jian-min, ZHANG Bin-ying, MA Jian-ji

(Material Surface Strengthening Research Institute, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compare the wear properties of micro-arc oxidation (MAO) coating of aluminum alloy in two solution systems. In this paper, MAO coatings on 2A12 aluminum alloy were prepared by MAO technology. The morphology, thickness, phase composition, hardness and wear properties of the MAO coatings were investigated by means of Scanning Electron Microscope (SEM), X-ray Diffraction Spectrometer (XRD), Vicker hardness tester and friction tester respectively. The results showed that the growth rate of coating in zircon salt system is higher than that in phosphate system. The hardnesses of

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2019-11-26

Received: 2019-08-29; Revised: 2019-11-26

作者简介: 黄利保 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 铝合金表面改性。

**Biography:** HUANG Li-bao (1995—), Male, Master, Research focus: surface modification of aluminum alloys.

通讯作者: 郝建民 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 材料表面改性、热喷涂技术。邮箱: h-jianmin@126.com

**Corresponding author:** HAO Jian-min (1961—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface modification of materials, thermal spraying technology. E-mail: h-jianmin@126.com

引文格式: 黄利保, 郝建民, 张斌英, 等. 2A12 铝合金在两种体系中微弧氧化膜层的磨损性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(5): 185-190.  
HUANG Li-bao, HAO Jian-min, ZHANG Bin-ying, et al. Wear Properties of Microarc Oxidation Coating of 2A12 Aluminum Alloy in Two Systems[J]. Surface technology, 2020, 49(5): 185-190.

zircon salt and phosphate were 1050HV and 1250HV, respectively. The coating of zircon salt system is mainly composed of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , c- $\text{ZrO}_2$  and t- $\text{ZrO}_2$  phases. The coating of phosphate system coating is composed by  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  phases. In the zircon salt system, the friction coefficient of the coating under the voltage of 450 V and 500 V are 0.425 and 0.375 respectively. In the phosphate system, the friction coefficient of the coating under the voltage of 450 V and 500 V are 0.328 and 0.325 respectively. The friction coefficient of zircon salt coating is higher than that of phosphate coating. During the wear process, the friction auxiliary material GCr15 is filled into the pits of the coating. Under high voltage, the coating in two solution system exhibits a smaller coefficient of friction. The initial stage of wear is abrasive wear and the stable stage is adhesive wear.

**KEY WORDS:** aluminum alloy; micro-arc oxidation; zirconium salt; phosphate; wear resistance

铝及铝合金由于其比强度高、易于加工、导热和导电性高等优点而被广泛地应用于航空、航天、汽车、轮船、装饰等各个领域<sup>[1-2]</sup>。但是铝及其合金，由于其硬度低、摩擦系数大<sup>[3]</sup>，所以铝合金的使用受到很大的限制，改善其表面性能是满足其使用要求的一个重要方法。微弧氧化处理可以显著地改变铝合金表面的硬度、耐腐蚀性以及耐磨性能<sup>[4-5]</sup>。

微弧氧化 (Microarc oxidation, MAO) 又称微等离子体氧化 (Microplasma oxidation, MPO)，是一种能耗低、环境友好、工艺简单、电解液利用率较高的表面改性方法<sup>[6-8]</sup>。微弧氧化膜层是原位生长膜层，其结合力较强，不易脱落<sup>[9-12]</sup>。李斌等<sup>[13]</sup>研究了  $\text{ZrO}_2$  纳米粉对 Al-Si 合金微弧氧化陶瓷层组织和性能的影响，研究表明：随着纳米  $\text{ZrO}_2$  颗粒浓度的增加，膜层的厚度和孔径都呈增大的趋势。才文兰等<sup>[14]</sup>研究了纳米  $\text{ZrO}_2$  微粒对 TC4 合金表面微弧氧化陶瓷膜层耐蚀及耐磨性能的影响，发现当  $\text{ZrO}_2$  含量为 9 g/L 时，得到了耐腐蚀和耐磨损性能最好的膜层。陈法蒿等<sup>[15]</sup>研究了  $\text{ZrO}_2$  含量对 TC4 钛合金微弧氧化复合膜摩擦磨损性能的影响，表明当复合膜层中  $\text{ZrO}_2$  含量为 23.59% 时，复合膜层表现出最小的摩擦系数，膜层最稳定，且磨损量最小。

近年来研究较多的是在电解液中加入一些纳米颗粒来制取复合微弧氧化膜层，以提高膜层的耐磨损性能。此类方法虽然可以有效地提高复合膜层的磨损性能，但是直接添加的纳米颗粒在电场作用下会产生团聚，这种团聚不利于纳米颗粒在膜层中的均匀分布。本文拟采用原位合成方法在锆盐溶液体系中制备含有  $\text{ZrO}_2$  的微弧氧化膜层，并与磷酸盐体系中制得的膜层进行比较。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 材料

实验选择 2A12 铝合金作为微弧氧化基体，试样规格为 20 mm×20 mm×3 mm，实验前通过砂纸打磨到 800 目，并用去离子水在超声波中清洗。微弧氧化电解液为锆盐溶液和磷酸盐溶液，锆盐溶液 pH 为 5~6，磷酸盐溶液 pH 为 11~13。溶液成分如表 1 所示。

表 1 两种电解液体系组成

Tab.1 The composition of two electrolytic liquid systems

Electrolytic liquid	Composition
Zircon salt	$\text{K}_2\text{ZrF}_6$ , $\text{NH}_4\text{HF}_2$ , EDTA-2Na
Phosphate	$(\text{NaPO}_3)_6$ , $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , EDTA-2Na

### 1.2 方法

实验采用长安大学自制的 MAO-100D 型微弧氧化电源及装置制备铝合金表面膜层。微弧氧化电源的频率为 500 Hz，占空比为 15%，在冷却系统的作用下使溶液温度保持在 20℃ 左右。在微弧氧化过程中，以铝合金为阳极，不锈钢为阴极，在恒流模式下（电流密度控制在 3 A/dm<sup>2</sup> 以下）微弧氧化处理时间为 30 min，终止电压为 450 V 和 500 V。微弧氧化处理后用去离子水反复清洗，以去除表面残留的溶液。

采用 VEGA II XMU 型扫描电子显微镜 (SEM) 和 7718 型能谱仪 (EDS) 分别分析铝合金膜层表面和截面的形貌以及元素分布。膜层粗糙度用型号为 SJ-210 表面粗糙度测试仪进行测量，在不同区域测量 5 次，取其平均值。

微弧氧化膜层的相组成用 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪进行分析，X 射线扫描  $2\theta$  角为 20°~80°。表面显微硬度的测量选用 300 g+30 s 参数测量不同的区域 5 次，取平均值。膜层厚度由厚度测试仪进行测试，测量不同的区域 5 次，取平均值。

采用 MMQ-02G 型摩擦磨损机对锆盐体系和磷酸盐体系中制得的微弧氧化膜进行干摩擦条件下的磨损行为测试。实验中，选择直径为 6 mm 的 GCr15 球作为对磨材料，试验参数为：磨损半径 3 mm，载荷 6 N，转速 100 r/min，时间 15 min。在磨损试验过程中，记录微弧氧化涂层的摩擦系数。利用扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对磨损表面进行观察和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 溶液体系对铝合金微弧氧化表面及截面形貌的影响

在锆盐体系中处理后得到的微弧氧化膜层如图

1a、c 所示，在磷酸盐体系中处理后得到的微弧氧化膜层如图 1b、d 所示。从图 1 中可以看出，无论是锆盐体系还是磷酸盐体系，其微弧氧化膜层都有共同的特征：表面存在均匀分布的微孔，而且在微孔周围分布着微裂纹。微孔是微弧氧化过程中的反应区和反应物质排出的通道。裂纹的形成与微弧氧化反应产物排出后冷却有关，在电解液的冷却作用下，放电通道排出

的反应产物瞬间冷却凝固，从而使膜层中存在应力，所以就形成了微弧氧化微孔附近的微裂纹。由于锆盐体系是酸性体系，磷酸盐是碱性体系。在锆盐体系中，试样表面放出的气体较碱性体系中放出的气体多且剧烈，所以比较图 1a、b 和图 1c、d 可以看出：锆盐体系下膜层表面的孔隙率和孔径都明显比磷酸盐体系下的膜层要大，但是微裂纹的数量在磷酸盐体系中更多。

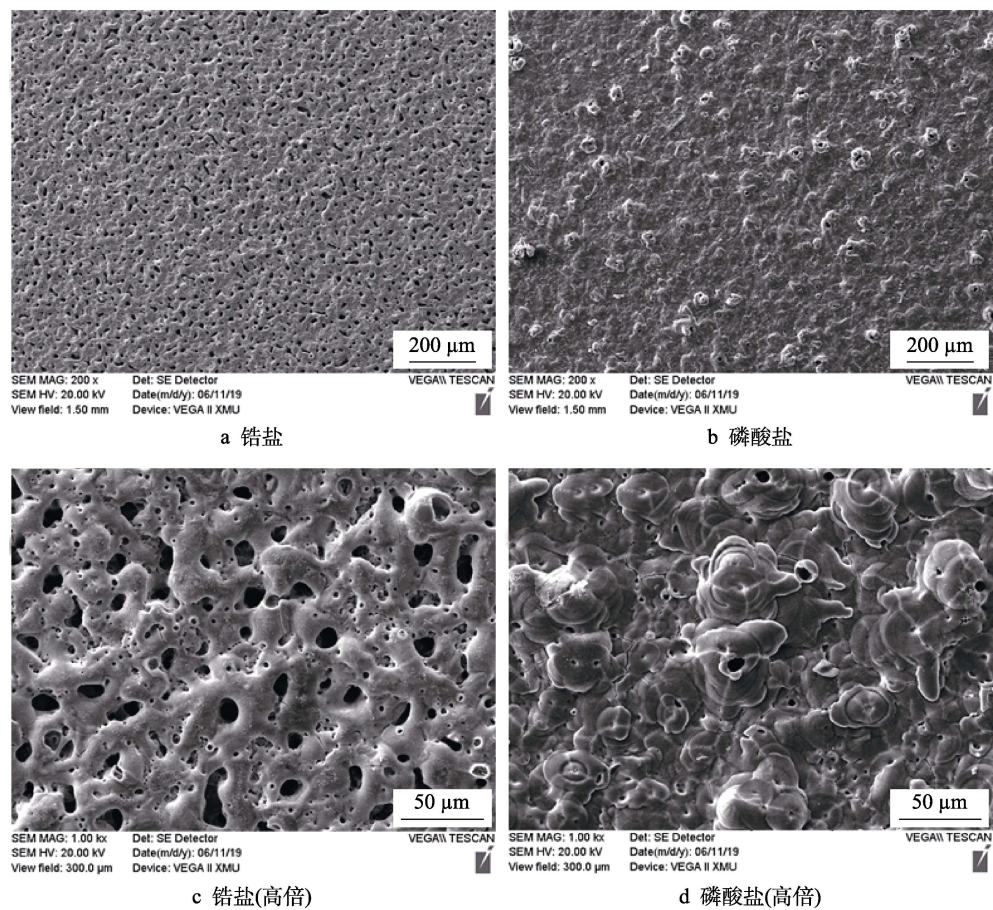


图 1 微弧氧化处理后表面形貌  
Fig.1 Surface morphology after micro-arc oxidation treatment: (a, c) zircon salt, (b, d) phosphate

微弧氧化处理后膜层的截面形貌如图 2 所示。由图 2 可知，在相同终止电压和时间下，锆盐体系下微弧氧化膜层的厚度可达 60 μm 左右，而在磷酸盐体系下微弧氧化膜层只有 30 μm 左右，这与表 2 中厚度测试仪测得的厚度数值一致。结合图 1 可知：锆盐体系中制得的膜层表面微孔的数量以及孔径都远远高于磷酸盐中制得的膜层。这使得在微弧氧化过程中，锆

盐体系的反应区域相对于磷酸盐的大，反应产物也相对较多，所以锆盐体系中微弧氧化膜层的厚度较厚。在相同的时间和终止电压下，锆盐体系中膜层的生长速率更快。由表 2 可知，在相同时间和终止电压下，锆盐体系中膜层的厚度比磷酸盐中膜层的厚度大得多，而膜层的粗糙度却相差不多。

2.2 微弧氧化膜层物相组成

两种体系中制得的膜层的物相组成如图 3 所示，可知在两种体系中制得的膜层的主要相组成都含有 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，而锆盐体系中制得的膜层中还含有 ZrO<sub>2</sub>，说明在微弧氧化的过程中通过原位合成生长出了 ZrO<sub>2</sub>·γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 950~1200 ℃ 下转变为 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[16]</sup>。在微弧氧化过程中，试样表面的放电区域温度可达 2000 ℃，所以在高温、高压的作用下，大量的 γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

表 2 微弧氧化膜层厚度、硬度、粗糙度值  
Tab.2 Thickness, hardness and roughness of micro-arc oxidation coating

Electrolyte system	Thickness/ μm	Hardness (HV)	Roughness/ μm
Zircon salt	64	1050	2.45
Phosphate	31	1250	2.20





图2 微弧氧化处理后截面形貌  
Fig.2 Section morphology after micro-arc oxidation treatment: (a) zircon salt, (b) phosphate

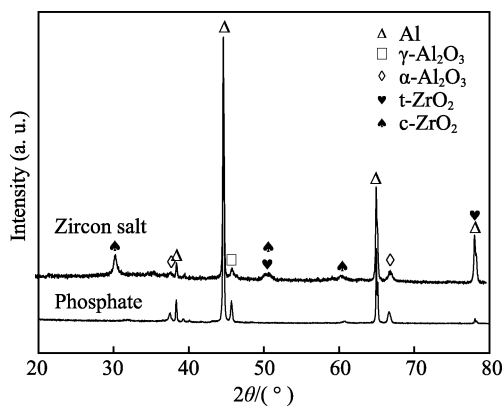


图3 不同体系中膜层的物相组成  
Fig.3 Phase composition of coatings in different systems

转变为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  是密排六方结构, 其密度和硬度相较于  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  更高, 这也是膜层硬度较高的原因之一。

## 2.3 微弧氧化膜层摩擦性能

### 2.3.1 不同体系对膜层摩擦性能的影响

在两种体系中制得的膜层的摩擦系数如图4所示。由图4可知, 在锆盐体系中制得的膜层的摩擦系数比在磷酸盐体系下制得的膜层的摩擦系数大。究其原因, 一方面锆盐体系下制得的膜层的表面粗糙度比

较大, 表面粗糙度越大越不利于膜层的摩擦; 另一方面, 由膜层的表面形貌可知, 锆盐体系下的膜层表面较磷酸盐体系下的膜层表面, 孔隙率和孔径都比较大。膜层的致密程度也影响膜层的摩擦系数。其次, 膜层硬度对摩擦系数有较大的影响, 硬度越高, 摩擦系数越小。

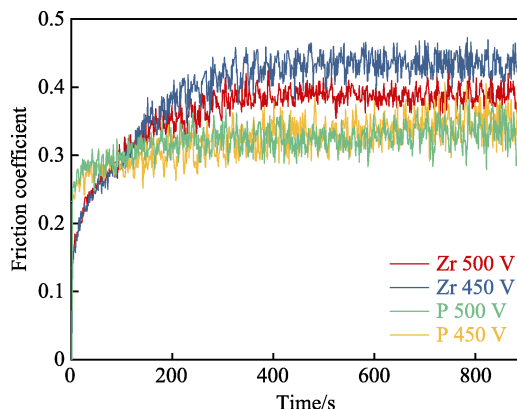


图4 不同膜层的摩擦系数  
Fig.4 Friction coefficients of different coatings

两种体系下, 膜层在磨损前期的摩擦系数较小, 这是因为在磨损前期, 由于岛状凸起而使得膜层与对磨材料的接触面积较小, 摩擦力较小。随着摩擦的进行, 对磨材料由于被磨掉而使得与膜层的接触面积越来越大, 摩擦力随着增大, 摩擦系数也随着增大。当磨损到一定阶段时, 由于对磨材料已经完全填充到膜层的凹陷处, 在后续的磨损过程中不会有凸起对对磨材料进行破坏, 膜层与对磨材料的接触面基本稳定, 这时摩擦力较稳定, 摩擦系数达到一个平衡值。

### 2.3.2 电压对膜层摩擦性能的影响

实验发现, 锆盐溶液体系中, 当电压升高到一定值后, 有电流会出现突然增大, 电压随之下降的现象, 并且膜层会出现局部放电剧烈的现象, 这是由于  $\text{ZrO}_2$  的高温导电性造成的。当温度高于  $800^\circ\text{C}$  时,  $\text{ZrO}_2$  的导电能力大大提高<sup>[17]</sup>。所以, 实验中控制微弧氧化的终止电压为 500 V。如图4所示, 无论哪种溶液体系, 在高电压下制得的膜层的摩擦系数都较小, 这是因为在高电压的作用下, 膜层表面的温度和压力相较于低电压下都大, 这使得膜层的烧结和凝固比在低电压下更好。另外, 由于高电压下微弧氧化过程中的反应区域温度高, 使得反应产物的结晶度较低电压下更高, 所以膜层在高电压下具有较小的摩擦系数。

## 2.4 磨损机理分析

图5为磨损后膜层的微观形貌, 可以看出磨损后的膜层表面存在磨损产物, 磨损后的膜层几乎没有被破坏, 只是附着断断续续的磨损产物。为了分析磨损产物的成分, 在如图5c、d所示位置对其进行EDS分析, 可以看出附着的磨损产物主要有C、O、Fe, C和Fe元素来源于GCr15钢球。在磨损过程中, 由

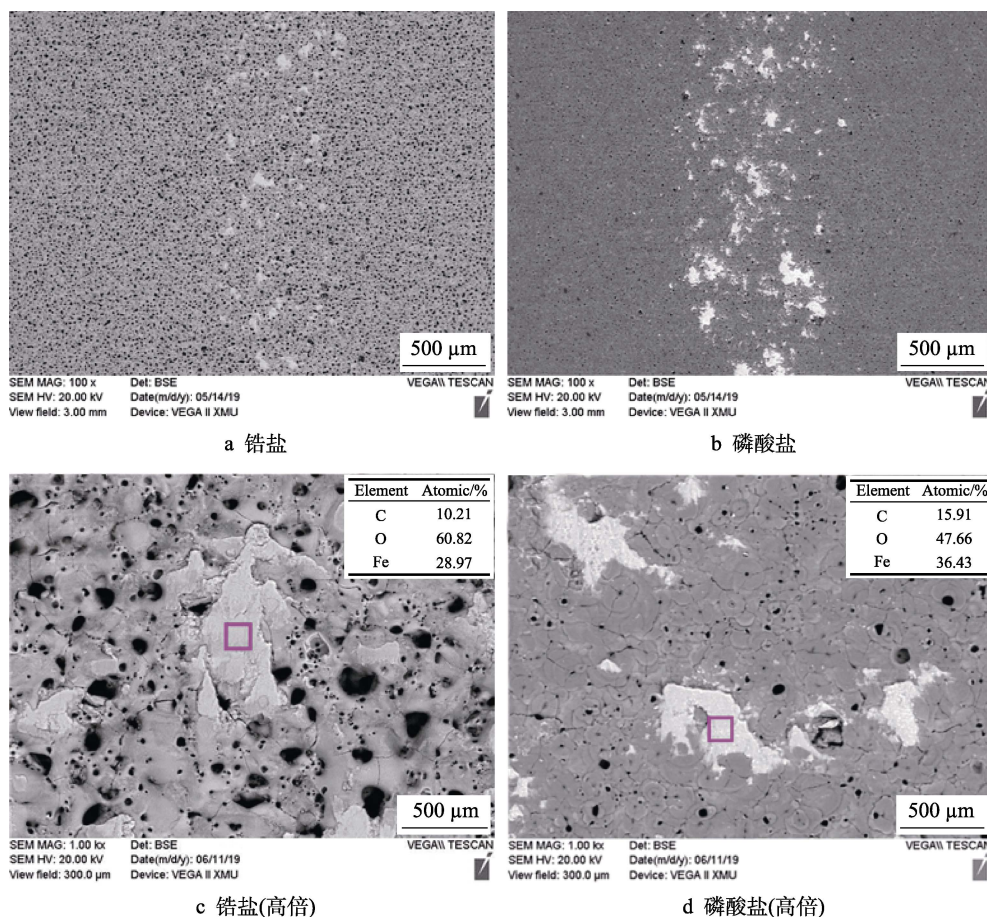


图 5 磨损后形貌及 EDS 分析

Fig.5 Morphology and EDS analysis after wear: (a, c) zircon salt, (b, d) phosphate

于膜层与对磨材料之间的作用,使得在接触位置产生大量的热量,且磨损试验在空气下进行,有一定的湿度,高温作用下使得 Fe 元素被氧化,所以在磨损产物中会检测到 O 元素。

由于微弧氧化膜层的硬度远高于对磨材料。在磨损起始阶段,微弧氧化膜层表面凸起部分对对磨材料产生切削作用,且切削下来的对磨材料粘着在膜层的凹陷表面,所以磨损起始阶段,膜层对对磨材料的磨损机理主要是磨粒磨损。随着磨损达到稳定阶段,膜层表面被填充后变得较为平整,此时是填充的对磨材料和膜层之间的磨损,稳定阶段后的磨损机理表现出粘着磨损特征。

### 3 结论

1) 相同的时间和终止电压下, 锆盐体系中膜层的生长速率更大。

2) 锆盐体系下膜层相组成主要有  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{c-ZrO}_2$  以及少量  $\text{t-ZrO}_2$ ; 磷酸盐体系下膜层的主要相成分是  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 。

3) 磷酸盐体系下膜层的摩擦系数较锆盐体系下的膜层小, 两种体系下制得的膜层在高终止电压下具有较低的摩擦系数。

4) 两种膜层在摩擦起始阶段, 膜层凸起部分表现出对对磨材料的切削作用下的磨粒磨损。稳定阶段的磨损具有粘着磨损特征。

### 参考文献:

- [1] MILLERWS, ZHUANG L, BOTTEMA J, et al. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry[J]. Materials science and engineering: A, 2000, 280(1): 37-49.
- [2] KAUSHIK N C, RAO R N. Effect of grit size on two body abrasive wear of Al6082 hybrid composites produced by stir casting method[J]. Tribology international, 2016, 102: 52-60.
- [3] LYU X C, CAO L, WAN Y, et al. Effect of different electrolytes in micro-arc oxidation on corrosion and tribological performance of 7075 aluminum alloy[J]. Materials research express, 2019, 6(8): 086421.
- [4] LI Z Y, CAI Z B, CUI Y, et al. Effect of oxidation time on the impact wear of micro-arc oxidation coating on aluminum alloy[J]. Wear, 2019, 426: 285-295.
- [5] TIAN Q P, SUN J K, KUO Y C, et al. Anomalous layer-thickening during micro-arc oxidation of 6061 Al alloy[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 697: 326-332.
- [6] LI X Y, LI X G, LI X, et al. Growth mechanism of micro-

- arc oxidation film on 6061 aluminum[J]. Materials research express, 2019, 6(6): 066404.
- [7] LI H X, SONG R G, JI Z G, et al. Effects of nano-additive  $\text{TiO}_2$  on performance of micro-arc oxidation coatings for MED on 6063 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(2): 6-11.
- [8] CHENG Y L, MAO M K, CAO J H, et al. Plasma electrolytic oxidation of an Al-Cu-Li alloy in alkaline aluminate electrolytes: A competition between growth and dissolution for the initial ultra-thin films[J]. Electrochimica acta, 2014, 138: 417-429.
- [9] JAVIDI M, FADAEE H. Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior[J]. Applied surface science, 2013, 286: 212-219.
- [10] TERLEEVA O P, SLONOV A A I, BELEVANTSE V V I. Strength characteristics of 2024 aluminum alloy substrate with plasma electrolytic oxidation coatings[J]. Materials research express, 2018, 5(9): 096508.
- [11] FADAEE H, JAVID I M. Investigation on the corrosion behaviour and microstructure of 2024-T3Al alloy treated via plasma electrolytic oxidation[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 604: 36-42.
- [12] SHANKAR M P, SOKKAALING A M R, SIVAPRASA D K, et al. Effect of electrolyte on micro-arc oxidation coating of Al-2014 alloy[J]. Advanced materials research, 2018, 1148: 159-164.
- [13] 李斌, 王萍.  $\text{ZrO}_2$  纳米粉对 Al-Si 合金微弧氧化陶瓷层组织和性能的影响[J]. 西安工业大学学报, 2019, 39(4): 442-450.
- LI Bin, WANG Ping. Effect of  $\text{ZrO}_2$  nano-powder on microstructure and properties of PEO ceramic layer on Al-Si alloy surface[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2019, 39(4): 442-450.
- [14] 才文兰, 史海兰, 王振霞, 等. 纳米  $\text{ZrO}_2$  微粒对 TC4 合金表面微弧氧化陶瓷膜层耐蚀及耐磨性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 89-96.
- CAI Wen-lan, SHI Hai-lan, WANG Zhen-xia, et al. Effect of nano- $\text{ZrO}_2$  particles on corrosive and abrasive performances of the micro-arc oxidized ceramic[J]. Surface technology, 2019, 48(7): 89-96.
- [15] 陈法嵩, 赵晴, 杜楠, 等.  $\text{ZrO}_2$  含量对 TC4 钛合金微弧氧化复合膜摩擦磨损性能的影响[J]. 材料保护, 2016, 49(6): 1-4.
- CHEN Fa-song, ZHAO Qing, DU Nan, et al. Influences of  $\text{ZrO}_2$  content on the friction and wear properties of micro-arc oxidation composite coating[J]. Materials protection, 2016, 49(6): 1-4.
- [16] 桓思恒. 正向电流和钨酸钠对铝合金微弧氧化陶瓷层生长及摩擦磨损行为的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- HUAN Si-heng. Effect of positive peak current and sodium tungstate on friction and wear properties of micro-arc oxidation ceramic layer on aluminum alloy[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [17] 欧阳静, 金娇, 李晓玉, 等. 氧化锆( $\text{ZrO}_2$ )的电、光性质与应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(8): 497-505.
- OUYANG Jing, JIN Jiao, LI Xiao-yu, et al. Electronic and optical properties of  $\text{ZrO}_2$  and its applications[J]. Materials China, 2014, 33(8): 497-505.

(上接第 176 页)

- [8] XING D, WU F, WANG R, et al. Microdrop-assisted microdomain hydrophilicization of superhydrophobic surfaces for high-efficiency nucleation and self-removal of condensate microdrops[J]. ACS applied materials & interfaces, 2019, 11: 7553-7558.
- [9] RYKACZEWSKI K, SCOTT J H J, FEDOROV A G. Electron beam heating effects during environmental scanning electron microscopy imaging of water condensation on superhydrophobic surfaces[J]. Applied physics letters, 2011, 98(9): 53-98.
- [10] 唐海达, 张涛, 刘晓华, 等. 辐射吊顶表面冷凝液滴脱落尺寸分析[J]. 化工学报, 2016, 67(9): 3552-3558.
- TANG H D, ZHANG T, LIU X H, et al. Size of departing condensate droplets from radiant cooling ceiling[J]. Journal of chemical industry and engineering, 2016, 67(9): 3552-3558.
- [11] 汪峰, 梁彩华, 张友法, 等. 结霜初期超疏水表面凝结液滴的自跳跃脱落及其对结霜过程的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(4): 757-762.
- WANG F, LIANG C H, ZHANG Y F, et al. Jumping of condensation droplets on superhydrophobic surfaces at early frosting stage and its effects on frost formation[J]. Journal of Southeast University(natural science), 2016, 46(4): 757-762.
- [12] CHU F Q, WU X M, MA Q. Condensed droplet growth on surfaces with various wettability[J]. Applied thermal engineering, 2017, 115: 1101-1108.
- [13] ZHANG W, LIN G, LI J, et al. Fabrication of biomimetic polymer nanocone films with condensate microdrop self-removal function[J]. Advanced materials interfaces, 2015, 2(12): 1500238-5.
- [14] 李凯祥. 氢氧化铜纳米针阵列滴状冷凝传热研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015: 19-23.
- LI K X. Investigation of steam dropwise condensation heat transfer on copper hydroxide nanoneedle array[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015: 19-23.
- [15] 曹树龙. 铜材表面超疏水纳米膜构筑及抗凝露与滴状冷凝性能研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013: 26-31.
- CAO S L. Construction of superhydrophobic nanofilm on the surface of copper and studies on the performances of anti-dew and dropwise condensation[D]. Suzhou: Suzhou University, 2013: 26-31.
- [16] 刘宝. 铜基表面无机纳米结构的原位构筑及滴状冷凝传热性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2015: 39-40.
- LIU B. In situ growth of inorganic nanostructure on copper-based surface and dropwise condensation heat transfer performance study[D]. Jinan: Jinan University, 2015: 39-40.
- [17] HE M, ZHOU X, ZENG X, et al. Hierarchically structured porous aluminum surfaces for high-efficient removal of condensed water[J]. Soft matter, 2012, 8(25): 6680-6683.